



⑮ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 55 930 A 1**

⑤ Int. Cl.⁷:
G 01 N 27/414

⑲ Aktenzeichen: 101 55 930.5
⑳ Anmeldetag: 14. 11. 2001
㉑ Offenlegungstag: 22. 5. 2003

DE 101 55 930 A 1

⑦① Anmelder:
Universität Gesamthochschule Kassel, 34121
Kassel, DE

⑦④ Vertreter:
Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336 München

⑦② Erfinder:
Edinger, Klaus, Dr., Laurel, Md., US; Rangelow,
Ivajlo, Dr., 34225 Baunatal, DE; Grabiec, Piotr, Dr.,
Warschau/Warszawa, PL; Melngailis, John, Dr.,
Chevy Chase, Md., US

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:
DE 41 15 414 C2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ **Feldeffekttransistor-Sensor**

⑤⑦ Die Erfindung betrifft einen Sensor, insbesondere für eine Sonde eines Rastersondenmikroskops, zum Untersuchen sich benachbart zum Sensor befindlicher Probenoberflächen oder Felder mit zumindest einem, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET). Des Weiteren betrifft die Erfindung einen Hallsensor aus zumindest einem Halbleitermaterial zum Detektieren von magnetischen Feldern, dessen laterales Auflösungsvermögen elektrisch einstellbar ist, sowie eine Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche elektrisch einstellbar ist.

DE 101 55 930 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft einen Sensor mit zumindest einem, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET).

[0002] Grundsätzlich ist die Verwendung eines Feldeffekttransistors, insbesondere eines Metalloxidhalbleiter-Feldeffekttransistors (MOS-FET), als Sensor bekannt. Während bei einem herkömmlichen MOS-FET der elektrische Widerstand des Transistorkanals (gate) mittels einer durch eine Oxidschicht gegenüber dem Kanal isolierten Kanalelektrode gesteuert wird, ist eine derartige Elektrode bei einem FET-Sensor nicht vorgesehen. Bei der Verwendung des FET als Sensor wird der Widerstand des Transistorkanals durch die Wechselwirkung mit einer zu untersuchenden Probe beeinflusst, wodurch sich Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Probe, insbesondere der Probenoberfläche, ziehen lassen.

[0003] Aus der US 4,873,871 ist beispielsweise die Verwendung eines Feldeffekttransistors als Beschleunigungssensor bekannt. Dabei ist in der Nähe des Transistorkanals ein bei Beschleunigung des Sensors auslenkbarer Mikrobalken derart angeordnet, dass sich bei Annäherung des Mikrobalkens an den Transistorkanal oder bei Entfernung des Mikrobalkens vom Transistorkanal der Kanalwiderstand entsprechend ändert.

[0004] In der US 4,020,830 ist die Verwendung eines Feldeffekttransistors als chemischer Sensor offenbart. Dabei ist auf einer Isolationsschicht des Transistorkanals eine Membran angebracht, die mit der Oberfläche einer zu untersuchenden Probe, beispielsweise einer Flüssigkeit, in Kontakt gebracht wird. Die Membran ist derart ausgebildet, dass sie selektiv mit einer vorbestimmten Art von Ionen der Probe wechselwirkt. Das Anlegen einer Spannung zwischen der Probe und dem Transistor resultiert in einer Wechselwirkung zwischen der Membran und den Ionen der Probe, die ihrerseits zu einer Veränderung des Kanalwiderstandes des Transistors führt, die Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der zu untersuchenden Probe zulässt.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Feldeffekttransistor-Sensor zur Untersuchung von Probenoberflächen mit möglichst hoher Ortsauflösung zu schaffen.

[0006] Zur Lösung der Aufgabe ist ein Sensor mit den Merkmalen des Anspruchs 1 vorgesehen.

[0007] Ein erfindungsgemäßer Sensor, insbesondere für eine Sonde eines Rastersondenmikroskops, zum Untersuchen sich benachbart zum Sensor befindlicher Probenoberflächen oder Felder sieht zumindest einen, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET) ohne Kanalelektrode vor, dessen Oberfläche zumindest im Bereich des Kanals (gate) dreidimensional ausgebildet ist.

[0008] Die laterale Auflösung eines FET-Sensors hängt sowohl vom Abstand des Sensors zur Probe, der im Wesentlichen durch die Dicke einer den Transistorkanal überdeckenden Schicht aus einem Dielektrikum begrenzt ist, als auch von der Dimension des Kanals, d. h. seiner Länge und seiner Breite, ab. Je kleiner der Proben/Sensor-Abstand gewählt und je kleiner der Kanal dimensioniert ist, desto höher ist das Auflösungsvermögen des Sensors.

[0009] Dabei ist die Dimension des Transistorkanals unter anderem durch die bei der Herstellung des FET-Sensors eingesetzten Verfahren, insbesondere die Lithographieverfahren, vorgegeben. Ist die Transistoroberfläche im Bereich des Kanals, wie erfindungsgemäß vorgesehen, zusätzlich jedoch dreidimensional, beispielsweise spitz, ausgebildet, und wird der Kanal z. B. über den Scheitelpunkt einer aus einem Halbleitermaterial bestehenden Pyramide oder eines Kegels gelegt, kann das laterale Auflösungsvermögen wegen der

Abstandsabhängigkeit der elektrischen Feldstärke die Dimension des Kanals und somit das sonst durch die Strukturierungsverfahren begrenzte maximale Auflösungsvermögen übersteigen. Durch die erfindungsgemäß vorgesehene dreidimensionale Ausbildung der Transistoroberfläche zumindest im Bereich des Kanals (gate) ist das laterale Auflösungsvermögen eines erfindungsgemäßen Sensors folglich gegenüber einem Sensor mit planer Transistoroberfläche erhöht.

[0010] Ein erfindungsgemäßer Sensor lässt sich also besonders gut zur Detektion von elektrischen, magnetischen und/oder chemischen Wechselwirkungen sowie zur Detektion elektromagnetischer Strahlung mit hoher Ortsauflösung einsetzen.

[0011] Da eine derartige Spitzegeometrie auch bei Detektionssonden in der Rasterkraftmikroskopie verwendet wird, kann ein erfindungsgemäßer Sensor darüber hinaus zusätzlich oder gleichzeitig als Sonde eines herkömmlichen Rasterkraftmikroskops verwendet werden.

[0012] Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind den Unteransprüchen, der Beschreibung und der Zeichnung zu entnehmen.

[0013] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Sensors ist die Oberfläche im Bereich des Kanals (gate) pyramidenartig ausgebildet. Dadurch lässt sich die Abstandsabhängigkeit der elektrischen Feldstärke besonders gut zur Verbesserung des Auflösungsvermögens des Sensors ausnutzen. Darüber hinaus lassen sich pyramidenartige Strukturen, insbesondere in kristallinen Halbleitersubstraten, durch Plasma-Ätzverfahren leicht erzeugen (vgl. z. B. H. Jansen et al., A Survey on the Reactive Ion Etching of Silicon in Microtechnology, J. Micromech. Microeng., Vol. 6, 14ff (1996)).

[0014] Alternativ kann die Oberfläche im Bereich des Kanals (gate) kegelförmig, treppenartig oder keilförmig ausgebildet sein.

[0015] Gemäß einer Variante des erfindungsgemäßen Sensors ist der Transistor als Feldeffekttransistor vom Anreicherungsstyp (enhancement mode FET) ausgebildet.

[0016] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Sensors ist der Transistor als Feldeffekttransistor vom Verarmungsstyp (depletion mode FET) ausgebildet. In Transistoren dieses Typs fließt bereits ohne ein äußeres elektrisches Feld ein Strom zwischen Quelle (source) und Senke (drain), der ein Maß für den elektrischen Widerstand des Kanals (gate) darstellt. Im Gegensatz zum FET vom Anreicherungsstyp muss der Kanal nicht erst durch ein äußeres Feld invertiert werden, um einen Stromfluss zwischen Quelle und Senke zu ermöglichen, so dass beim FET-Sensor vom Verarmungsstyp vergleichsweise kleine elektrische Felder ausreichen, um den Kanalwiderstand zu verändern, und somit der Messung zugänglich gemacht werden. Die Verwendung eines Feldeffekttransistors vom Verarmungsstyp resultiert folglich in einem Sensor mit erhöhter Empfindlichkeit.

[0017] Besonders günstig ist es, wenn der Sensor eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung aufweist, um den elektrischen Widerstand des Kanals (gate) elektrisch vor einzustellen. Auf diese Weise lässt sich die Empfindlichkeit des erfindungsgemäßen Sensors auf die Stärke eines elektrischen Feldes anpassen.

[0018] Vorteilhafterweise ist der Transistor als Sperrschicht-Feldeffekttransistor (junction field effect transistor JFET) ausgebildet. Derartige Transistoren ermöglichen auf einfache Weise die Einstellung des Kanalwiderstandes auf einen vorbestimmten Wert.

[0019] Weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zum ortsaufgelösten Untersuchen einer sich im wesent-

lichen in XY-Richtung erstreckenden Probenoberfläche, bei dem ein Sensor nach einer der voranstehend genannten Art an einem zur Probenoberfläche weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird, der Sensor in die Nähe der Probenoberfläche gebracht wird, zwischen Quelle (source) und Senke (drain) des Transistors eine Spannung angelegt wird, zwischen Probe und Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird, der Sensor, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probenoberfläche bewegt wird, wobei entweder der Sensor in einer konstanten Höhe Z bezüglich der XY-Ebene über der Probenoberfläche gehalten wird und der Stromfluss von der Quelle (source) durch den Kanal (gate) zur Senke (drain) gemessen und in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird, oder der Sensor derart in konstantem Abstand zur Probenoberfläche bewegt wird, dass der Stromfluss von der Quelle (source) durch den Kanal (gate) zur Senke (drain) konstant bleibt, und das Ausmaß einer Bewegung des Sensors in Z-Richtung in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird, und aus den aufgezeichneten Strom- oder Auslenkungswerten ein Abbild der Probenoberfläche erstellt wird.

[0020] Das erfindungsgemäße Verfahren stellt eine Möglichkeit zur Verwendung eines erfindungsgemäßen Sensors dar, bei der das Auflösungsvermögen des Sensors besonders gut ausgenutzt werden kann.

[0021] Bevorzugt wird ein FET-Sensor vom Verarmungstyp verwendet und eine Einstellspannung an den Sensor angelegt, um den Widerstand des Kanals (gate) auf einen vorbestimmten Wert voreinzustellen. Dadurch lässt sich die Empfindlichkeit des Sensors auf die zu untersuchende Probe anpassen.

[0022] Weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Hallsensor aus zumindest einem Halbleitermaterial zum Detektieren von magnetischen Feldern, dessen laterales Auflösungsvermögen elektrisch einstellbar ist. Mittels eines derartigen Hallsensors lässt sich die Stärke eines magnetischen Feldes besonders gut ortsaufgelöst messen.

[0023] Bevorzugt sind bei einem erfindungsgemäßen Hallsensor zumindest zwei quer zueinander, insbesondere senkrecht aufeinanderstehende, sich in einem Kreuzungsbereich kreuzende Kanäle in einem Substrat vorgesehen, die eine gegenüber dem Substrat umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger aufweisen, wobei an einem Kanal zur Erzeugung eines Stromflusses durch den Kanal eine Steuerspannung anlegbar und an dem anderen Kanal eine durch ein magnetisches Feld erzeugte Hallspannung messbar ist.

[0024] Vorteilhafterweise weist ein erfindungsgemäßer Hallsensor eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung auf, um die Ausdehnung des Kreuzungsbereiches in der durch die Kanäle aufgespannten Ebene einzustellen. Auf diese Weise ist das Auflösungsvermögen des Hallsensors einstellbar, insbesondere erhöhbar.

[0025] Weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche elektrisch einstellbar ist. Mittels einer derartigen Elektrode lassen sich besonders hoch ortsaufgelöste Kapazitätsmessungen oder elektrochemische Potentialbestimmungen an zu untersuchenden Proben durchführen.

[0026] Vorteilhafterweise ist in einer erfindungsgemäßen Halbleiterelektrode in einem Halbleitersubstrat ein von außerhalb des Substrats kontaktierbarer, im wesentlichen parallel zur Substratoberfläche verlaufender erster Kanalabschnitt vorgesehen, der in einen senkrecht zur Substratoberfläche verlaufenden zweiten Kanalabschnitt übergeht, welcher an die Substratoberfläche grenzt, wobei die Elektrodenfläche durch die laterale Ausdehnung des zweiten Kanalab-

schnitts an der Substratoberfläche bestimmt ist.

[0027] Bevorzugt weisen die Kanalabschnitte eine gegenüber dem Substrat umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger auf.

[0028] Besonders günstig ist es, wenn die Halbleiterelektrode eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung aufweist, um die Ausdehnung der Kanalabschnitte und insbesondere die Ausdehnung des zweiten Kanalabschnitts an der Substratoberfläche einzustellen. Dadurch ist die Elektrodenfläche einstellbar, insbesondere verringerbar, wodurch sich die Auflösung einer ortsaufgelösten Kapazitätsmessung oder Potentialbestimmung einstellen, insbesondere erhöhen lässt.

[0029] Weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur ortsaufgelösten Kapazitätsmessung oder elektrochemischen Potentialbestimmung einer sich in XY-Richtung erstreckenden Probe, bei dem eine Halbleiterelektrode nach einer der voranstehend genannten Arten an einem zur Probenoberfläche weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird, an dem Halbleitersubstrat eine Einstellspannung angelegt wird, um die Ausdehnung der Elektrodenfläche auf einen vorbestimmten Wert einzustellen, die Elektrode, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probe bewegt wird, die Elektrode in vorbestimmten Abständen mit der Probe in Kontakt gebracht wird, wobei zwischen Probe und Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird, die Kapazität oder das elektrochemische Potential der Probe bestimmt und in Abhängigkeit der XY-Position der Elektrode aufgezeichnet wird, und aus den aufgezeichneten Kapazitäts- oder Potentialwerten ein Abbild der Probe erstellt wird.

[0030] Nachfolgend werden die verschiedenen Aspekte der Erfindung rein beispielhaft anhand jeweils einer Ausführungsform unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben. Es zeigen:

[0031] Fig. 1 einen Feldeffekttransistor vom Anreicherungstyp ohne Kanalelektrode;

[0032] Fig. 2 einen Sperrschicht-Feldeffekttransistor vom Verarmungstyp ohne Kanalelektrode;

[0033] Fig. 3 einen erfindungsgemäßen Sensor;

[0034] Fig. 4 alternative Ausbildungen der Sensoroberfläche im Bereich des Kanals;

[0035] Fig. 5 eine Draufsicht eines erfindungsgemäßen Hallsensors;

[0036] Fig. 6 eine Schnittansicht des Hallsensors entlang der Linie A-A von Fig. 5;

[0037] Fig. 7 eine Draufsicht einer erfindungsgemäßen Halbleiterelektrode;

[0038] Fig. 8 eine Schnittansicht der Halbleiterelektrode entlang der Linie B-B von Fig. 7.

[0039] In Fig. 1 ist ein als Detektor einsetzbarer bekannter planarer Feldeffekttransistor (FET) vom Anreicherungstyp (enhancement mode FET) dargestellt, der ein p-dotiertes Siliziumsubstrat 10 umfasst. In der Nähe einer Sensoroberfläche 12 weist das Substrat 10 zwei jeweils n⁺-dotierte Bereiche 14, 16 auf, wobei der eine Bereich 14 mittels einer Senkelektrode 18 kontaktiert und mit einer Spannungsquelle 20 verbunden ist und als Senke (drain) wirkt. Der andere n⁺-dotierte Bereich 16 ist mittels einer Quellenelektrode 22 geteert und wirkt als Quelle (source). Die Sensoroberfläche 12 ist mit einer Schicht 24 aus einem Dielektrikum, vorzugsweise aus Siliziumdioxid, versehen.

[0040] Der zwischen Senke 14 und Quelle 16 gelegene oberflächennahe Bereich des Substrats 10 bildet den Kanal 26 (gate) des Transistors. Während bei Metalloxidhalbleiter-Feldeffekttransistoren (MOS-FET) im Bereich des Kanals 26 typischerweise eine Kanalelektrode auf der Oxydschicht 24 angebracht wird, um durch eine an die Kanalelektrode

angelegte Spannung die Leitfähigkeit des Kanals 26 und somit den Stromfluss von Quelle 16 zu Senke 14 zu steuern, ist bei einem als Sensor eingesetzten FET eine solche Kanalelektrode nicht vorgesehen. Bei derartigen Sensortransistoren erfolgt die Beeinflussung der Leitfähigkeit des Kanals 26 durch elektrische, magnetische oder chemische Wechselwirkungen des Kanals 26 mit zu untersuchenden äußeren Feldern oder Probenoberflächen, oder indem die Sensoroberfläche 12 elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt wird.

[0041] Bei dem in Fig. 1 gezeigten Sensor handelt es sich um einen FET vom Anreicherungstyp, das bedeutet, der Kanal 26 weist grundsätzlich die gleiche Dotierung wie das Substrat 10 auf. Ein Stromfluss von Quelle 16 zu Senke 14 kann daher nur erfolgen, wenn der Kanal 26 invertiert wird, d. h. wenn ein äußeres zu untersuchendes elektrisches Feld so stark ist, dass durch die Erzeugung einer ausreichenden Anzahl beweglicher Ladungsträger (Elektronen) der elektrische Widerstand des Kanals 26 ausreichend verringert wird.

[0042] Da für die Inversion des Kanals 26 entsprechend starke elektrische Felder nötig sind, weist ein FET vom Anreicherungstyp eine relativ geringe Sensorempfindlichkeit auf. Zusätzlich muss der Kanal 26 über seine gesamte Länge invertiert werden, um einen Stromfluss von Quelle 16 zu Senke 14 zu erreichen. Da das Auflösungsvermögen eines derartigen Sensors neben der Dicke der Oxidschicht 24 auch durch die Dimension des Kanals 26 bestimmt ist, ist das Auflösungsvermögen des in Fig. 1 gezeigten Sensors durch den Abstand zwischen Senke 14 und Quelle 16 begrenzt, d. h. es kann nicht besser als die Länge des Kanals 26 sein.

[0043] In Fig. 2 ist ein Sensor nach Art eines Sperrschicht-Feldeffekttransistors (junction field effect transistor JFET) vom Verarmungstyp mit planarer Sensoroberfläche 12 dargestellt. Im Gegensatz zum FET vom Anreicherungstyp weist der Kanal 26 eines FET vom Verarmungstyp eine Dotierung vom gleichen Typ wie Senke 14 und Quelle 16 auf – im gezeigten Beispiel eine n-Dotierung. Das System Kanal 26/Substrat 10 bildet folglich einen pn-Übergang.

[0044] Der Kanal 26 ist bereits in einem Ausgangszustand leitend, so dass bei Anlegen einer Spannung zwischen Senke 14 und Quelle 16 auch ohne die Wechselwirkung des Sensors mit einem äußeren elektrischen Feld ein Strom fließt. Auf diese Weise werden schwächere elektrische Felder einer Messung zugänglich gemacht, so dass ein FET vom Verarmungstyp eine höhere Sensorempfindlichkeit aufweist als ein FET vom Anreicherungstyp. Gleichzeitig kann ein höheres Auflösungsvermögen des Sensors erreicht werden, da für einen Stromfluss zwischen Quelle 16 und Senke 14 nicht der gesamte Kanal 26 invertiert werden muss. Die Auflösung ist grundsätzlich also nicht durch die Länge des Kanals 26 begrenzt.

[0045] Zusätzlich ist das Substrat 10 eines JFET mit einer Einstellelektrode 28 kontaktiert, die mit einer Spannungsquelle 30 verbunden ist, um zwischen Substrat 10 und Kanal 26 eine Einstellspannung anzulegen. Durch die Einstellspannung lässt sich die Ausdehnung des Kanals 26 in zur Sensoroberfläche 12 senkrechter Richtung, d. h. die Tiefe des Kanals 26, variieren. Durch Anlegen der Spannung in Sperrrichtung des pn-Übergangs kann der Querschnitt des Kanals 26 durch Verarmung an Ladungsträgern verkleinert werden.

[0046] Man gewinnt durch die Einstellspannung folglich eine zusätzliche Möglichkeit, die Leitfähigkeit des Kanals 26 voreinzustellen und somit die Empfindlichkeit des Sensors an die Stärke eines zu untersuchenden elektrischen Feldes anzupassen.

[0047] Fig. 3 zeigt einen erfindungsgemäßen Sensor nach Art eines Sperrschicht-Feldeffekttransistors (JFET) vom

Verarmungstyp. Im Gegensatz zu bekannten, beispielsweise in Fig. 1 und Fig. 2 gezeigten, Sensoren ist die Sensoroberfläche 12 des erfindungsgemäßen Sensors zumindest bereichsweise dreidimensional und vorzugsweise als Spitze ausgebildet. Eine nicht abschließende Auswahl erfindungsgemäß in Betracht kommender Ausbildungen einer dreidimensionalen Sensoroberfläche 12 ist exemplarisch in Fig. 4 dargestellt: So kann die Sensoroberfläche 12 beispielsweise als (a) 3- oder 4-seitige Pyramidenspitze oder als (b) Kegelspitze ausgebildet sein. Denkbar ist aber auch eine (c) treppentartige oder (d) keilförmige Ausbildung der Spitze. Darüber hinaus umfasst die erfindungsgemäße dreidimensionale Ausbildung der Substratoberfläche 12 auch sphärische Formen.

[0048] Die Sensoroberfläche 12 des Sensors in Fig. 3 ist zumindest bereichsweise als Pyramidenspitze ausgebildet. Eine derartige Struktur lässt sich durch bekannte Ätz- oder Sägeverfahren in Substraten, insbesondere aus kristallinem Silizium, leicht herstellen.

[0049] Das Substrat 10 des Sensors besteht aus p-dotiertem Silizium, während Senke 14 und Quelle 16 als n-dotierte Bereiche im Substrat 10 ausgebildet sind. Dabei sind Senke 14 und Quelle 16 an der Pyramidenbasis im planaren Bereich 32 der Sensoroberfläche 12 angeordnet und erstrecken sich in einem oberflächennahen Bereich entlang eines größten Teils der Pyramidenflanken 34 in Richtung der Pyramidenspitze 36. Der oberflächennahe Bereich der Pyramidenspitze 36 selbst ist als Kanal 26 ausgebildet. Dabei kann es sich, wie bereits voranstehend erläutert, um einen invertierten oder dotierten Kanal handeln, so dass ein Sensor nach Art eines FET vom Anreicherungstyp oder – wie im dargestellten Beispiel – vom Verarmungstyp vorliegt.

[0050] Mittels einer an der Senke 14 angebrachten Senkelektrode 18 sowie einer an der Quelle 16 angebrachten Quellenelektrode 22 lässt sich zwischen Senke 14 und Quelle 16 mittels einer Spannungsquelle 20 eine Spannung anlegen und mittels einer Strommesseinrichtung 38 ein durch den Kanal 26 zwischen Quelle 16 und Senke 14 fließender Strom messen. Dabei lässt sich durch eine mittels einer am Substrat 10 angebrachten Einstellelektrode 28 an das Substrat 10 anlegbare Spannung der elektrische Widerstand des Kanals 26 voreinstellen.

[0051] Wird der Sensor, d. h. die Pyramidenspitze 36, nunmehr in die Nähe oder in Kontakt mit der Probenoberfläche 40 einer zu untersuchenden Probe 42 gebracht und zwischen Sensor und Probe 42 mittels einer Spannungsquelle 44 eine Spannung angelegt, so wird zwischen Probenoberfläche 40 und Pyramidenspitze 36 ein elektrisches Feld erzeugt, welches auf den Kanal 26 einwirkt und dessen Leitfähigkeit verändert. Anhand des in der Messeinrichtung 38 ermittelten Stromflusses zwischen Senke 14 und Quelle 16 lässt sich die Stärke des elektrischen Feldes zwischen Probenoberfläche und Pyramidenspitze 36 ermitteln und auf die Beschaffenheit der Probenoberfläche 40 zurückschließen.

[0052] Das laterale Auflösungsvermögen des Sensors ist zum einen vom Abstand der Pyramidenspitze 36 zur Probenoberfläche 40 abhängig. Dabei wird ein minimaler Abstand durch die Dicke der die Sensoroberfläche 12 überdeckenden Oxidschicht 24 vorgegeben.

[0053] Zum anderen hängt das Auflösungsvermögen von der lateralen Ausdehnung des Kanals 26 ab. Da der Kanal 26 erfindungsgemäß über den Scheitel der Pyramidenspitze 36 gelegt ist, ist die effektive Dimension des Kanals 26 wegen der quadratischen Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke vom Abstand zur Probenoberfläche 40 kleiner als die tatsächliche Dimension des Kanals 26. Das Auflösungsvermögen des Sensors wird umso höher, je steiler die Pyramide ausgebildet ist, d. h. je kleiner der Winkel ist, den die Pyra-

midenflanken 34 miteinander bilden.

[0054] Ein erfindungsgemäßer Sensor lässt sich beispielsweise in der Spitze einer Rastersonde eines Rastersondenmikroskops integrieren und in einer Rasterbewegung relativ zu einer Probenoberfläche bewegen, wodurch eine hoch orts aufgelöste Untersuchung einer Probenoberfläche ermöglicht wird.

[0055] Dabei lässt sich der Sensor beispielsweise in einer konstanten Höhe Z bezüglich einer zumindest annähernd durch die Probenoberfläche 40 definierten XY-Ebene über die Probenoberfläche 40 hinweg bewegen, wobei in Abhängigkeit vom Ort des Sensors der Stromfluss durch den Transistor aufgezeichnet wird. Alternativ kann der Sensor der Kontur der Probenoberfläche 40 folgend derart über die Probenoberfläche 40 hinweg bewegt werden, dass der Stromfluss durch den Transistor stets konstant bleibt, wobei die Auslenkung des Sensors in Z-Richtung in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird. In beiden Fällen lässt sich ein orts aufgelöstes Abbild der Probenoberfläche 40 erstellen, welches Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Probe 42 oder Probenoberfläche 40 zulässt.

[0056] Da auch in der Rasterkraftmikroskopie Sonden mit Spitzengeometrie verwendet werden, kann ein erfindungsgemäßer Sensor zusätzlich oder gleichzeitig auch für eine Sonde eines konventionellen Rasterkraftmikroskops verwendet werden.

[0057] In Sensoren, die auf dem Prinzip des Feldeffekttransistors vom Verarmungstyp basieren, kann durch Anlegen einer Sperrspannung an das Halbleitersubstrat 10 die effektive Breite und Tiefe des Kanals 26 verringert werden und damit sowohl die Sensitivität als auch die laterale Auflösung des Sensors über das durch die lithographische Strukturierung vorgegebene Maß hinaus erhöht werden. Durch die Kombination des JFET-Prinzips mit einem Verarmungstyp FET lassen sich somit eine Vielzahl von hochauflösenden Sensoren realisieren, welche auf einer Änderung des Kanalwiderstands durch Wechselwirkung mit der zu untersuchenden Probe 42 beruhen:

1. Detektoren für elektrische Felder, die zwischen einer zu untersuchenden Festkörperoberfläche und dem Sensor bestehen, wobei sich die Feldstärke aus dem an der zu untersuchenden Probe anliegenden elektrischen Potential, der Dielektrizitätskonstanten eines auf der Probenoberfläche vorhandenen Isolatormaterials und dem Probenabstand zum Sensor ergibt.
2. Detektoren für elektrische Ladungen, insbesondere elektrisch geladene Moleküle oder Atome (Ionen), welche sich in der Nähe des Sensors in der Gasphase, in Lösung oder absorbiert an einer Festkörperoberfläche befinden.
3. Chemische Sensoren, durch die eine selektive Anlagerung von chemischen Spezies (z. B. Ionen oder Molekülen) an eine entsprechend präparierte Kanalelektrode detektierbar ist. Durch die Anlagerung wird das Potential der Kanalelektrode (z. B. durch eine Änderung der Austrittsarbeit des Elektrodenmaterials) verschoben, was eine messbare Änderung des Kanalwiderstands zur Folge hat. Als chemisch selektive Materialien dienen dabei entweder die Kanalelektrode selbst (z. B. Palladium für Wasserstoff) oder andere, meist organische Materialien, welche die zu detektierende Spezies selektiv binden. Das selektive Material befindet sich dabei entweder zwischen der Kanalelektrode und der den Kanal überdeckenden Oxidschicht (vgl. z. B. US 4,698,657) oder wird, beispielsweise als selbstorganisierender Dünnschicht (self assembled monolayer), direkt auf die Kanalelektrode aufgebracht (vgl. z. B.

US 4,881,109).

Bei einem chemischen Sensor ohne Kanalelektrode kann das elektrische Feld über den FET-Kanal auch durch eine Elektrolytlösung erzeugt werden, welche mittels einer ionenselektiven Membran in direktem Kontakt mit der den Kanal überdeckenden Oxidschicht steht (vgl. P. Bergveld, IEEE Transactions of Biomedical Engineering; Vol. 19; 342ff (1972), und K.D. Wise et al., IEEE Transactions of Biomedical Engineering; Vol. 21; 485ff (1974)).

Im Gegensatz zu den zitierten verschiedenen Ausführungsarten chemischer FET-Sensoren ist erfindungsgemäß die chemische Detektion mittels FET-Sensoren im Verarmungsbetrieb und insbesondere in Kombination mit dem Sperrschichtbetrieb (JFET-Effekt) vorgesehen.

4. Hochauflösende Temperatursensoren für die Rastersondenmikroskopie, bei denen der Effekt ausgenutzt wird, dass sich der Widerstand des Kanals mit der Temperatur ändert.

[0058] Grundsätzlich ist der Einsatz erfindungsgemäßer Sensoren nicht auf Sondenspitzen begrenzt, sondern überall dort vorgesehen, wo bereits die Erhöhung der Auflösung in einer Dimension eine Verbesserung darstellt und/ oder die zweite Dimension durch andere lithographische Verfahren bestimmt wird. Als Beispiel sei die Anwendung als chemischer Detektor in einem mikrostrukturierten Transportkanal (microfluidic channel) zur spezifischen oder unspezifischen Detektion vorbeiströmender chemischer Spezies gemäß der voranstehend aufgeführten Punkte 2 und 3 genannt. Ein weiteres Beispiel stellt die Verwendung als elektrostatischer Abtastsensor ("Lesekopf") für auf Massenspeichern gespeicherte elektrische Ladungen dar, in Analogie zu einem magnetischen Lesekopf herkömmlicher Festplattenlaufwerke.

[0059] Einen weiteren Gegenstand der Erfindung stellt der in Fig. 5 gezeigte Hallsensor zur Detektion magnetischer Felder nach dem Halleffekt-Prinzip dar. Der erfindungsgemäße Hallsensor weist ein p-leitendes Siliziumsubstrat auf, in dessen oberflächennahem Bereich zwei n-leitende Kanäle 112, 114 vorgesehen sind, die senkrecht zueinander verlaufen und sich in einem Kreuzungsbereich 116 kreuzen. Durch Anlegen einer Spannung kann durch einen Kanal 112 ein konstanter Steuerstrom I_{steuer} fließen, wobei die durch ein äußeres magnetisches Feld erzeugte Hallspannung V_{RaM} am anderen Kanal 114 gemessen werden kann.

[0060] Die Kanäle 112, 114 bilden mit dem Substrat 110 jeweils einen pn-Übergang, wobei die Bereiche 122 die jeweiligen Raumladungs- oder Verarmungszonen kennzeichnen.

[0061] Wie in Fig. 6 gezeigt ist, ist am Substrat 110 eine mit einer Spannungsquelle 118 verbundene Elektrode 120 angebracht. Durch Anlegen einer Spannung zwischen den Kanälen 112, 114 und dem Substrat 110 lässt sich die Ausdehnung der Kanäle 112, 114 verändern, beispielsweise durch Verarmung an Ladungsträgern verringern, wenn die Spannung in Sperrrichtung der pn-Übergänge angelegt wird. Auf diese Weise wird lässt sich insbesondere auch der Kreuzungsbereich 116 verkleinern. Dies wiederum resultiert in einer Verbesserung des Auflösungsvermögens des Hallsensors.

[0062] Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist die in Fig. 7 gezeigte Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche erfindungsgemäß nach dem JFET-Prinzip einstellbar ist. Die Halbleiterelektrode weist ein p-leitendes Siliziumsubstrat 210 auf, in dem ein unterhalb einer Substratoberfläche 212 und im wesentlichen parallel zu dieser Oberfläche 212 verlaufender n-leitender Kanalabschnitt 214 ausgebildet ist. An

seinem einen Ende ist dieser Kanalabschnitt 214 mittels einer Elektrode 216 mit einer Strom- oder Spannungsquelle 218 verbunden. Am anderen Ende des parallel verlaufenden Kanalabschnitts 214 schließt sich ein senkrecht zur Oberfläche 212 verlaufender und bis an die Oberfläche 12 heranreichender Kanalabschnitt 220 an, dessen Ausdehnung an der Oberfläche 212 die Elektrodenfläche definiert.

[0063] Am Substrat 210 ist außerdem eine mit einer Spannungsquelle 222 verbundene Elektrode 224 zum Anlegen einer Sperrspannung angebracht. Durch Anlegen einer Sperrspannung zwischen dem Substrat 210 und dem n-dotierten Bereich 214, 220 kann die Ausdehnung des senkrechten Kanalabschnitts 220 an der Substratoberfläche 212 kontrolliert werden. Auf diese Weise lässt sich bei einer erfindungsgemäßen Halbleiterelektrode eine elektrisch einstellbare Elektrodenfläche erreichen, deren Größe die der lithographisch vorgegebenen Elektrodenfläche unterschreitet. [0064] Die erfindungsgemäße Halbleiterelektrode lässt sich folglich als Detektionsmittel mit einer elektrisch einstellbaren lateralen Auflösung verwenden, wobei die elektrisch eingestellte Auflösung die lithographisch vorgegebene Auflösung übertreffen kann. Darüber hinaus kann sich dadurch, dass der senkrecht verlaufende Kanalabschnitt 220 von dem entgegengesetzten elektrischen Potential des Substrats umgeben ist, eine Konzentration der Feldstärke in zur Substratoberfläche 212 senkrechter Richtung ergeben und zu einem Fokussierungseffekt führen, der zu einer weiteren Steigerung der Auflösung beiträgt.

[0065] Eine erfindungsgemäße Halbleiterelektrode kann beispielsweise als hoch ortsauflösende Sonde für Kapazitätsmessungen oder als elektrochemische Sonde zur Bestimmung des elektrochemischen Potentials einer Elektrolytlösung eingesetzt werden. Dabei kann die Halbleiterelektrode erfindungsgemäß in die Spitze einer Sonde eines Rastersondenmikroskops integriert sein und zur Kapazitätsmessung bzw. elektrochemischen Potentialbestimmung benutzt werden. In Verbindung mit Metallelektroden werden beide Mikroskopiearten angewendet und als "Scanning Capacitance Microscopy" (SCM) bzw. "Scanning Electrochemical Microscopy" (SECM) bezeichnet.

Bezugszeichenliste

10 Substrat
12 Sensoroberfläche
14 Senke
16 Quelle
18 Senkenelektrode
20 Spannungsquelle
22 Quellenelektrode
24 Oxidschicht
26 Kanal
28 Einstellelektrode
30 Spannungsquelle
32 planarer Bereich
34 Pyramidenflanke
36 Pyramiden Spitze
38 Strommessenrichtung
40 Probenoberfläche
42 Probe
44 Spannungsquelle
110 Substrat
112 Kanal
114 Kanal
116 Kreuzungsbereich
118 Spannungsquelle
120 Elektrode
122 Verarmungszone

210 Substrat
212 Oberfläche
214 paralleler Kanalabschnitt
216 Elektrode
218 Stromquelle
220 senkrechter Kanalabschnitt
222 Spannungsquelle
224 Elektrode

Patentansprüche

1. Sensor, insbesondere für eine Sonde eines Rastersondenmikroskops, zum Untersuchen sich benachbart zum Sensor befindlicher Probenoberflächen (40) oder Felder, mit zumindest einem, wenigstens ein Halbleitermaterial aufweisenden Feldeffekttransistor (FET) ohne Kanalelektrode, dessen Oberfläche (12) zumindest im Bereich des Kanals (gate 26) dreidimensional ausgebildet ist.
2. Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) pyramidenartig ausgebildet ist.
3. Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) kegelförmig ausgebildet ist.
4. Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) treppenartig ausgebildet ist.
5. Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche (12) im Bereich des Kanals (gate 26) keilförmig ausgebildet ist.
6. Sensor nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Transistor als Feldeffekttransistor vom Anreicherungstyp (enhancement mode FET) ausgebildet ist.
7. Sensor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Transistor als Feldeffekttransistor vom Verarmungstyp (depletion mode FET) ausgebildet ist.
8. Sensor nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch eine Elektrode (28) zum Anlegen einer Einstellspannung, um den elektrischen Widerstand des Kanals (gate 26) elektrisch voreinzustellen.
9. Sensor nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Transistor als Sperrschicht-Feldeffekttransistor (junction field effect transistor JFET) ausgebildet ist.
10. Verfahren zum orts aufgelösten Untersuchen einer sich im Wesentlichen in XY-Richtung erstreckenden Probenoberfläche (40), bei dem ein Sensor nach einem der vorherigen Ansprüche an einem zur Probenoberfläche (40) weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird, der Sensor in die Nähe der Probenoberfläche (40) gebracht wird, zwischen Quelle (source 16) und Senke (drain 14) des Transistors eine Spannung angelegt wird, zwischen Probe (42) und Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird, der Sensor, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probenoberfläche (40) bewegt wird, wobei entweder der Sensor in einer konstanten Höhe Z bezüglich der XY-Ebene über der Probenoberfläche (40) gehalten wird und der Stromfluss von der Quelle (source 16) durch den Kanal (gate 26) zur Senke (drain 14) gemessen und in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird,

oder der Sensor derart in konstantem Abstand zur Probenoberfläche (40) bewegt wird, dass der Stromfluss von der Quelle (source 16) durch den Kanal (gate 26) zur Senke (drain 14) konstant bleibt, und das Ausmaß einer Bewegung des Sensors in Z-Richtung in Abhängigkeit der XY-Position des Sensors aufgezeichnet wird, und
 aus den aufgezeichneten Strom- oder Auslenkungswerten ein Abbild der Probenoberfläche (40) erstellt wird.
 11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass ein Sensor nach einem der Ansprüche 7 bis 9 verwendet wird und eine Einstellspannung an den Sensor angelegt wird, um den Widerstand des Kanals (gate 26) auf einen vorbestimmten Wert voreinzustellen.
 12. Hallsensor aus zumindest einem Halbleitermaterial zum Detektieren von magnetischen Feldern, dessen laterales Auflösungsvermögen elektrisch einstellbar ist.
 13. Hallsensor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass in einem Substrat (110) zumindest zwei quer zueinander, insbesondere senkrecht aufeinander stehende, sich in einem Kreuzungsbereich (116) kreuzende Kanäle (112, 114) vorgesehen sind, die eine gegenüber dem Substrat (110) umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger aufweisen, wobei an einem Kanal (112) zur Erzeugung eines Stromflusses durch den Kanal (112) eine Steuerspannung anlegbar und an dem anderen Kanal (114) eine durch ein magnetisches Feld erzeugte Hallspannung messbar ist.
 14. Hallsensor nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine Elektrode (120) zum Anlegen einer Einstellspannung, um die Ausdehnung des Kreuzungsbereiches (116) in der durch die Kanäle (112, 114) angespannten Ebene einzustellen.
 15. Halbleiterelektrode, deren Elektrodenfläche elektrisch einstellbar ist.
 16. Halbleiterelektrode nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass in einem Halbleitersubstrat (210) ein von außerhalb des Substrats (210) kontaktierbarer, im wesentlichen parallel zur Substratoberfläche (212) verlaufender erster Kanalabschnitt (214) vorgesehen ist, der in einen senkrecht zur Substratoberfläche (212) verlaufenden zweiten Kanalabschnitt (220) übergeht, welcher an die Substratoberfläche (212) grenzt, wobei die Elektrodenfläche durch die laterale Ausdehnung des zweiten Kanalabschnitts (220) an der Substratoberfläche (212) bestimmt ist.
 17. Halbleiterelektrode nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Kanalabschnitte (214, 220) eine gegenüber dem Substrat (210) umgekehrte Polarität der Mehrheitsladungsträger aufweisen.
 18. Halbleiterelektrode nach Anspruch 17, gekennzeichnet durch eine Elektrode zum Anlegen einer Einstellspannung, um die Ausdehnung der Kanalabschnitte (214, 220) und insbesondere die Ausdehnung des zweiten Kanalabschnitts (220) an der Substratoberfläche (212) einzustellen.
 19. Verfahren zur orts aufgelösten Kapazitätsmessung oder elektrochemischen Potentialbestimmung einer sich in XY-Richtung erstreckenden Probe, bei dem eine Halbleiterelektrode nach einem der Ansprüche 15 bis 18 an einem zur Probenoberfläche weisenden Ende einer Sonde eines Rastersondenmikroskops angebracht wird,
 an dem Halbleitersubstrat eine Einstellspannung angelegt wird, um die Ausdehnung der Elektrodenfläche auf einen vorbestimmten Wert einzustellen,

die Elektrode, insbesondere in einer Rasterbewegung, in XY-Richtung relativ zur Probe bewegt wird, die Elektrode in vorbestimmten Abständen mit der Probe in Kontakt gebracht wird, wobei zwischen Probe und Sensor gegebenenfalls eine Spannung angelegt wird, die Kapazität oder das elektrochemische Potential der Probe bestimmt und in Abhängigkeit der XY-Position der Elektrode aufgezeichnet wird, und
 aus den aufgezeichneten Kapazitäts- oder Potentialwerten ein Abbild der Probe erstellt wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1

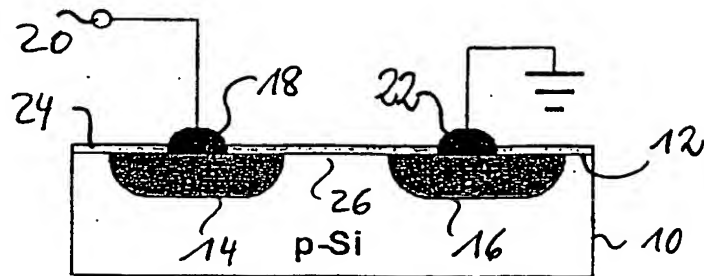


Fig. 2

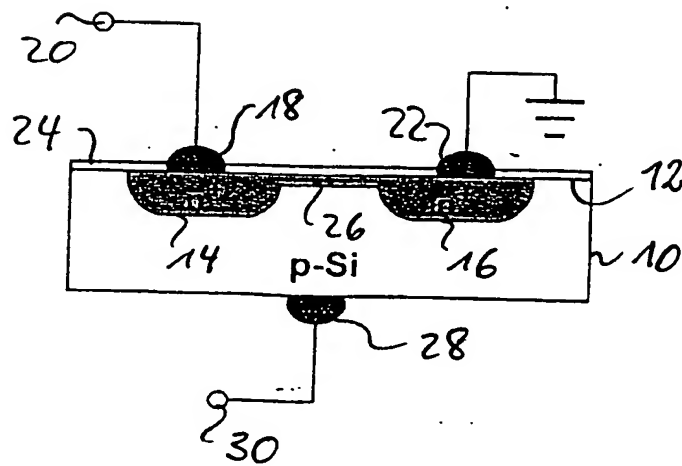


Fig. 4

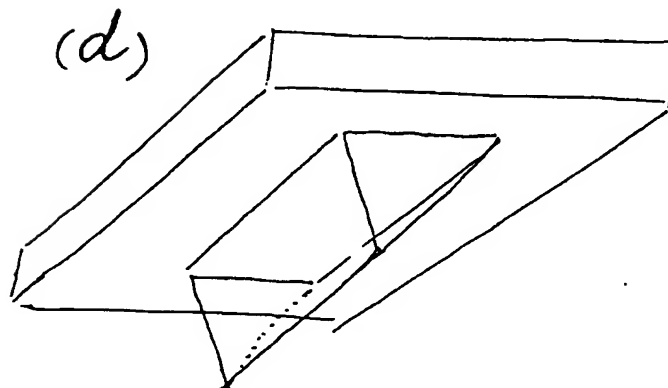
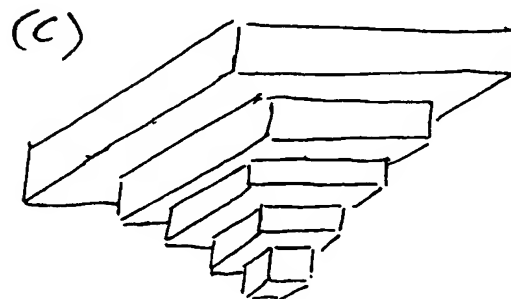
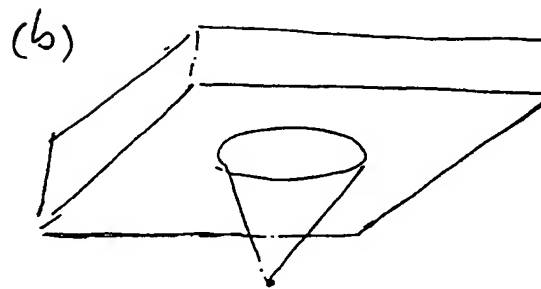
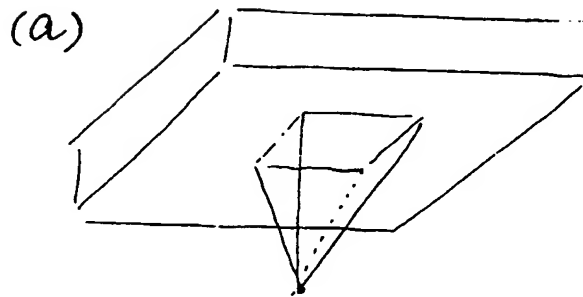


Fig. 5

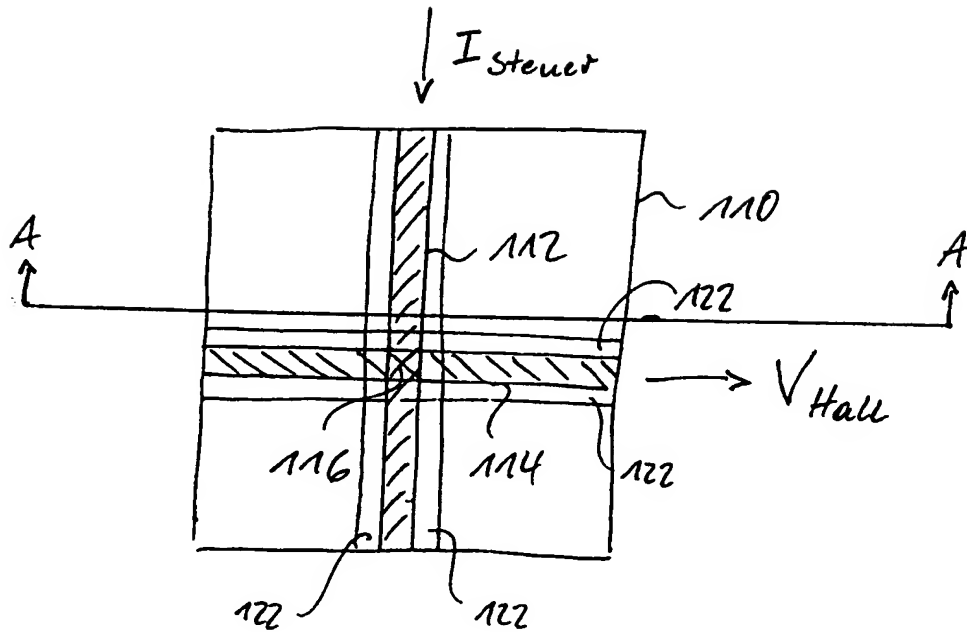


Fig. 6

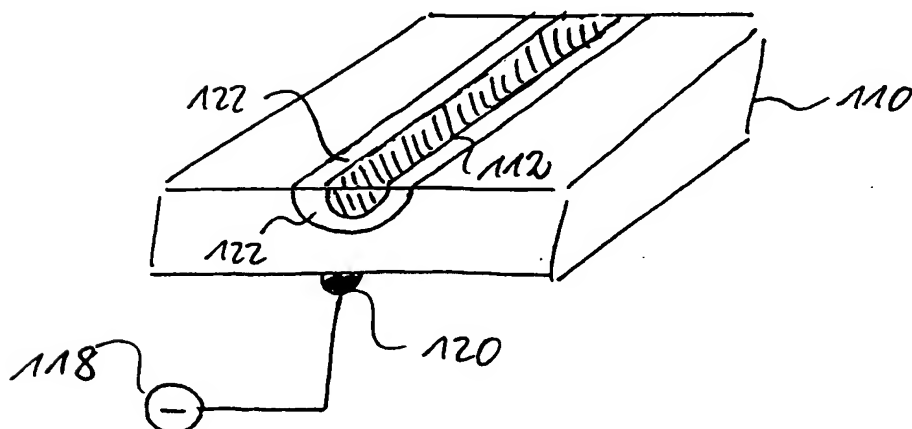


Fig. 7

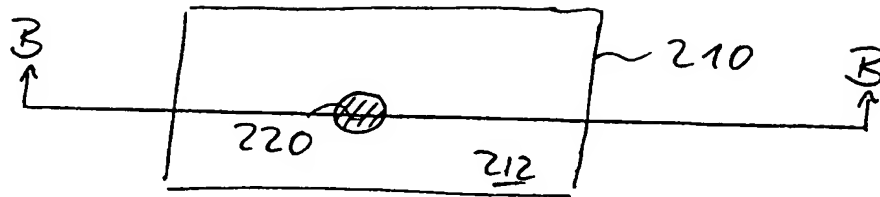


Fig. 8

